

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

IN RE APPLICATION OF: Yoshitsugu GOTO, et al.

GAU:

SERIAL NO: New Application

EXAMINER:

FILED: Herewith

FOR: METHOD OF IDENTIFYING BOUNDARY CONDITION BETWEEN COMPONENTS OF OBJECT OF ANALYSIS

REQUEST FOR PRIORITY

COMMISSIONER FOR PATENTS
ALEXANDRIA, VIRGINIA 22313

SIR:

- ☐ Full benefit of the filing date of U.S. Application Serial Number , filed , is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §120.
- ☐ Full benefit of the filing date(s) of U.S. Provisional Application(s) is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119(e): Application No. Date Filed

☒ Applicants claim any right to priority from any earlier filed applications to which they may be entitled pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119, as noted below.

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicants claim as priority:

<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NUMBER</u>	<u>MONTH/DAY/YEAR</u>
Japan	2002-224688	August 1, 2002

Certified copies of the corresponding Convention Application(s)

- ☒ are submitted herewith
- ☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee
- ☐ were filed in prior application Serial No. filed
- ☐ were submitted to the International Bureau in PCT Application Number
Receipt of the certified copies by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.
- ☐ (A) Application Serial No.(s) were filed in prior application Serial No. filed ; and
- ☐ (B) Application Serial No.(s)
☐ are submitted herewith
☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee

Respectfully Submitted,

OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,
MAIER & NEUSTADT, P.C.



Marvin J. Spivak

Registration No. 24,913

C. Irvin McClelland
Registration Number 21,124



22850

日 本 国 特 許 庁

JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2002年 8月 1日

出 願 番 号

Application Number:

特願2002-224688

[ST.10/C]:

[JP2002-224688]

出 願 人

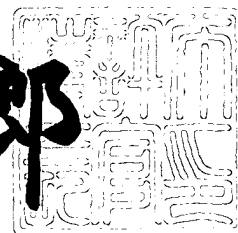
Applicant(s):

株式会社豊田中央研究所
トヨタ自動車株式会社

2003年 6月 6日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3044311

【書類名】 特許願

【整理番号】 TCP-00122

【提出日】 平成14年 8月 1日

【あて先】 特許庁長官殿

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 後藤 良次

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 尼子 龍幸

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 小島 芳生

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 稲垣 瑞穂

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 知久 一朗

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県豊田市トヨタ町1 番地 トヨタ自動車株式会社内

【氏名】 松島 徹

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県豊田市トヨタ町1 番地 トヨタ自動車株式会社内

【氏名】 早川 圭介
【特許出願人】
【識別番号】 000003609
【氏名又は名称】 株式会社豊田中央研究所
【特許出願人】
【識別番号】 000003207
【氏名又は名称】 トヨタ自動車株式会社
【代理人】
【識別番号】 100079049
【弁理士】
【氏名又は名称】 中島 淳
【電話番号】 03-3357-5171
【選任した代理人】
【識別番号】 100084995
【弁理士】
【氏名又は名称】 加藤 和詳
【電話番号】 03-3357-5171
【手数料の表示】
【予納台帳番号】 006839
【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9102478
【包括委任状番号】 9709128
【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 解析対象物の部品間境界条件の同定方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 複数部品で構成された解析対象物と、解析対象物の各部品間に位置しかつ各部品間の境界条件を表す複数の要素とを含んだ解析用の有限要素モデルを作成し、

前記有限要素モデルの固有周波数または共振周波数とモードベクトルとを計算し、

実験により求めたモードベクトルに対して相関度が高い計算により求めた計算モードベクトルを抽出し、

抽出した計算モードベクトル及び該計算モードベクトルに対応する固有周波数または共振周波数に基いて、各要素の境界条件を同定する

解析対象物の部品間境界条件の同定方法。

【請求項 2】 演算から除外したときに大きな相関度を与える自由度を n 個ずつ削除したときの残存する自由度で相関度を少なくとも 1 回求め、相関度が閾値を越えたときの残存自由度の個数が多い計算モードベクトルを、実験により求めたモードベクトルに対して相関度が高い計算モードベクトルとして抽出する請求項 1 記載の解析対象物の部品間境界条件の同定方法。

【請求項 3】 前記要素各々に対して複数の条件と該複数の条件の各々に対する複数の水準を定め、実験計画法によって各要素の固有周波数または共振周波数とモードベクトルとを計算する請求項 1 または請求項 2 記載の解析対象物の部品間境界条件の同定方法。

【請求項 4】 前記有限要素モデルの部品として、必要な周波数帯域までのモードベクトルを採用した部品単体のモード縮退モデルを用いる請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項記載の解析対象物の部品間境界条件の同定方法。

【請求項 5】 抽出した計算モードベクトル及び該計算モードベクトルに対応する固有周波数または共振周波数に基いて、複数の条件各々について実験と計算との誤差を表す評価値を演算し、該評価値が最小になるように各要素の境界条件を同定する解析対象物の部品間境界条件の同定方法。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】

本発明は、解析対象物の部品間境界条件の同定方法に係り、特に、構造物や機構物等の解析対象物を振動解析や運動解析の解析用の有限要素モデルに置き換え、実験により得られた参照データを基にしてそのモデルにおける部品間の境界条件の同定を行なう部品間境界条件の同定方法に関するものである。

【０００２】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】

ばね・質点系のパラメータ同定方法として、特開平５－２０９８０５号公報には、実験で求めた固有周波数を計算で求めた固有周波数と比較しながら、未知パラメータを変更して、ばね・質点のパラメータを同定する方法が記載されている。

【０００３】

しかしながら、上記の従来技術では、解析対象物を質点系に置き換えるため、構造物等の形状、構成、トポロジーが保存されない。このため、高周波数帯域まで精度の良い解析ができない上、形状、構成、トポロジーの情報を含んだモードの情報が欠落するため、詳細なモードを同定に用いることができない、という問題がある。

【０００４】

また、ばね・質点系のような力学系をベースにするため、系の力学方程式が陽に表せ得ないような、より多くの多自由度系や構造物の離散モデルへの拡張が難しく、現実の問題には適用し難い、という問題がある。

【０００５】

さらに、系の力学方程式を定式化し、最小二乗法等で系の同定を行う際に、用いたデータに誤差が混入するような場合には、ばねや質量が負になるという物理的な矛盾をきたすことがある。そして、同定変数を徐々に変化させながら、実験結果と計算結果との差を最小にする値を探索する方法では、感度が高い特定の変数のみで合わせ込もうとする局所解に陥る傾向があり、正しい同定値が得られな

い場合がある。

【０００６】

また、本発明に関連する技術として、特開平６－２９０２２５号公報には、制約と目標の曖昧性をファジー（メンバシップ関数）で表現し、実験計画法を利用して自動車部品を設計する方法が記載されている。特開平１０－２０７９２６号公報には、実験計画法と応答曲面法とを、座屈や圧潰への板厚の影響解析・設計式の作成に利用する構造物等の設計支援方法が記載されている。

【０００７】

また、特開２００１－１１７９５２号公報には、実験計画法と応答曲面法とを用い、構造解析に部分構造合成法を利用してそれに適した入力書式データベースを作成する最適設計システムが記載されている。特開平１０－３０１９７９号公報には、実験計画法を利用して、高感度なパラメータを抽出し、範囲設定の良否の判別をして、範囲を自動再設定する半導体集積回路のプロセス、デバイス・回路のシミュレーション用モデルのパラメータ抽出方法が記載されている。

【０００８】

特開平１１－２８１５２２号公報には、実験から得た固有振動数と固有モード形状から、方程式を立て、最小二乗法を用いて特性行列となる質量行列〔Ｍ〕剛性行列〔Ｋ〕を求める振動特性解析方法が記載されている。この方法では実験で得られる少ない個数のモードから、より多くの自由度数の特性行列を求めることができるが、特性行列は対称行列であること、減衰がないことが式の展開上の条件となっている。

【０００９】

本発明は、上記の問題点を解消するために成されたもので、振動や運動を精度良く定量的に扱うことができ、高周波数帯域まで精度の良い解析ができる解析対象物の部品間境界条件の同定方法を提供することを目的とする。

【００１０】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために、本発明は、複数部品で構成された解析対象物と、解析対象物の各部品間に位置しかつ各部品間の境界条件を表す複数の要素とを含

んだ解析用の有限要素モデルを作成し、前記有限要素モデルの固有周波数または共振周波数とモードベクトルとを計算し、実験により求めたモードベクトルに対して相関度が高い計算により求めた計算モードベクトルを抽出し、抽出した計算モードベクトル及び該計算モードベクトルに対応する固有周波数または共振周波数に基いて、各要素の境界条件を同定することを特徴としている。

【0011】

本発明は、形状やトポロジーの情報もを含み、構造物や機構物の振動形態や運動形態を実用的に充分表現できる有限要素モデルを用いることを特徴としている。

【0012】

振動解析や運動解析において、振動や運動を精度良く定量的に扱うためうには、構造物や機構物の形状、構成、トポロジーをできるだけ省略することなくモデル化することが必要である。本発明では、有限要素モデルを用いて、従来のように解析対象物をばね・質点系への簡易モデル化を行わないようにしているので、振動解析や運動解析を高い周波数帯域まで精度良く行なうことができる。

また、有限要素モデルを用いることにより、同定する際に必要な参照データとして、形状、構成、及び、トポロジーを詳細に表現する画像情報を利用することができるので、複雑なモードベクトルが現れる場合においても、この複雑なモードベクトルを同定に利用して精度を向上させることができる。

【0013】

従来のように、ばね・質点系へ簡易モデル化してしまうと、物理的意義が難解になり、解析者の熟練が必要になるが、本発明では、有限要素モデルを用いるので、実在する三次元空間内の位置での境界条件をそのまま認識することができ、解析者の熟練を必要とすることはない。

【0014】

また、本発明は、実験により求めた参照データのモードベクトルと解析結果による計算モードベクトルとの相関度を演算することで、同定対象となる構造物や機構物の振動形態や運動形態（モードベクトル）を、対応付けることを他の特徴

とする。

【0015】

モードベクトルの相関度を求めるには、相関分析の際に利用されるMAC (Modal Assurance Criteria) が利用される。MACは、比較するモードベクトルが全く同じかあるいは殆ど同じ場合には有効であるが、比較するモードベクトルの相違度が広がりMACの値が0.9や0.8以下となる場合には、比較するモードベクトルの相関度は、人間の感覚とずれる場合が少なくない。

【0016】

このため、本発明では、演算から除外したときに大きな相関度を与える自由度をn個削除したときの残存する自由度で相関度を少なくとも1回求め、相関度が閾値を越えたときの残存自由度の個数が多い計算モードベクトルを、実験により求めたモードベクトルに対して相関度が高い計算モードベクトルとして抽出するのが効果的である。

【0017】

m個の自由度のモードベクトルから削除するn個の自由度は、1個の自由度を演算から除外したときの相関度を除外する自由度を異ならせて各自由度に対して演算し、相関度が大きい順にn個選択して得られる。

【0018】

このように、演算から除外したときに相関度が最大になる自由度をn個ずつ削除することにより、残存する自由度で演算される相関度が自由度を削除する毎に大きくなるので、相関度が閾値を越えたときに、削除する自由度が少ない程、すなわち残存する自由度が多い程相関が高いと判断することができる。

【0019】

各要素の固有周波数または共振周波数とモードベクトルとは、要素各々に対して複数の条件と該複数の条件の各々に対する複数の水準を定め、実験計画法によって計算することができる。

【0020】

このように、実験計画法によって計算することにより同定過程において、解析

者が、同定対象の境界条件を選択し、境界条件の水準（例えば、最小値と最大値）を設定するだけで、要求する境界条件の値を求めることができる。なお、真値が水準からずれている場合には水準を設定し直せばよい。

【0021】

有限要素モデルが大規模になる場合には、有限要素モデルの部品として、必要な周波数帯域までのモードベクトルを採用した部品単体のモード縮退モデルを用いることにより、効率よく解析対象物の部品間境界条件を同定することができる。

【0022】

また、本発明の各要素の境界条件は、抽出した計算モードベクトル及び該計算モードベクトルに対応する固有周波数または共振周波数に基づいて、複数の条件各々について実験と計算との誤差を表す評価値を演算し、該評価値が最小になるように同定することができる。

【0023】

この実験計画法による同定では、境界条件の範囲を設定すれば、実験計画法に基づいて水準に応じた直交表が作成され、各条件に対して構造解析や固有値解析等の必要な解析が行なわれ、それらの解析結果と参照データとのベクトル量やスカラー量の誤差に基づく評価値が計算され、各条件毎に境界条件と評価値との関係から分散分析を行い推定式を作成した後、物理的最適化計算方法に基づいて、誤差に基づく評価値を最小にする最適化計算を行うことができるので、自動的に同定値が得られる。

【0024】

境界条件の値は、初期の設定範囲内、すなわち水準内でしか解をもたないので、発散することなく安定した解が得られる。もし、初期の設定範囲内で最小値か最大値が解となった場合は、該当する境界条件の設定値のみ設定範囲を変更して、再度同定計算を行えば、正しい境界条件の値を求めることができる。

【0025】

上記の同定計算を行なう際に、境界条件を直交表割付での設定値にした場合に計算されるモードベクトルは、数が膨大で、通常はどれが参照データのモードベ

クトルに該当するか判別できないので、計算されるモードベクトルと参照データのモードベクトルとの両者の誤差に基づく評価値を算出できない。

【００２６】

しかしながら、上記の同定では、参照データのモードベクトルに該当するものを、膨大なモードベクトルの中から自動的に見出すことができるので、誤差に基づく評価値を算出し、同定値を得ることができる。

【００２７】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。図１は、本発明の解析対象物の部品間境界条件の同定方法を実施するための同定装置を示すものである。

【００２８】

この同定装置は、解析対象物のデータ、境界条件、同定対象、及び水準値等のデータを入力する入力装置１０、実験により求めた各モードの固有周波数及びモードベクトルを格納したメモリで構成された実験データ格納装置１２、同定対象の固有周波数及びモードベクトル等を演算すると共に、評価関数に基いて同定対象の同定値等を演算するコンピュータで構成された演算装置１４、演算装置１４で演算された同定対象の固有周波数及びモードベクトル等を蓄積するメモリで構成された演算結果蓄積装置１６、及び、演算された同定値等を表示するＣＲＴ等で構成れた表示装置１８によって構成されている。

【００２９】

次に、コンピュータで構成された演算装置１４により実行される同定ルーチンを図２を参照して説明する。

【００３０】

ステップ１００では、入力装置１０から入力されたデータに基いて、部品間の境界条件を含めた有限要素モデル（ＦＥＭモデル）を作成し、入力装置１０から選択された境界条件の同定対象のデータを取り込む。

【００３１】

境界条件の同定対象としては、部品間の接触部の剛性でも減衰特性でもよい。

通常は、剛性の特性を並進や回転を表すばねで、また減衰を並進や回転を表すダッシュポットあるいは構造減衰でモデル化する。

【0032】

同定対象を選択した後、下記の表1に示す各同定対象の最小値と最大値とが水準として指定されるので、これらのデータを取り込む。

【0033】

【表1】

	同定対象1	同定対象2	同定対象3	...
最小値				
最大値				

【0034】

図3（A）に車両用ブレーキのFEMモデルの例を示し、図3（B）に部品間の接触部の局所的な剛性を同定対象としたときの部品間ばねの例を示す。図3（B）から理解されるように、車両用ブレーキのFEMモデルの部品は、キャリパー20、ピストン22、ブレーキパッド24、及び、ロータ26で構成されており、部品間に複数の部品ばね28が介在されている。

【0035】

ここで同定する部品間ばねは、領域毎に合計した値で表されており、FEMモデルのばねとしては、領域における分布を考慮して値を割り振っている。なお、更に減衰を同定対象とする場合も、ばねと並列にダッシュポットを配列して同様に扱う。

【0036】

次のステップ102では、実験計画法に基づいて固有値解析を行う。すなわち、上記ステップ100で選択した同定対象の数と指定した水準数とにより一意的に定まる境界条件の設定条件の設定数を演算し、条件毎に固有値解析を行って固有周波数と固有振動モードベクトルとを演算し、固有周波数と固有振動モードベクトルの演算結果を演算結果蓄積装置16に蓄積する。

【0037】

設定数は、選択した同定対象の数と指定した水準数とにより一意的に定まるの

で、例えば、下記表 2 に示すように、境界条件の数を 1 2 とし、設定する水準を最小値、最大値、中央値の 3 水準とした場合には、2 7 種類の境界条件の設定に対して固有周波数と固有振動モードベクトルとを計算することになる。

【0 0 3 8】

【表 2】

	条件 1	条件 2	条件 3	...
同定対象 1	最小	中間	最大	...
同定対象 2	最小	最小	中間	...
同定対象 3	最小	最小	中間	...
...
同定対象 n	最小	中間	最大	...

【0 0 3 9】

ステップ 1 0 4 では、下記で説明するモードのペアリングに備え、上記の計算結果を実験の結果と比較できるように、演算結果蓄積装置 1 6 から固有周波数及びモードベクトルを読み出し、実験で測定できた領域に限定した節点のモードベクトルに並び替える。

【0 0 4 0】

また、実験のモードベクトル測定位置のデータを、F E M の計算結果と比較できるように、実験の各測定位置に対して最も距離が近い F E M の節点を対応付ける。例えば、実験でモードデータを C C D カメラで測定する場合には、F E M の座標系と C C D カメラ画像の座標系とを対応付け、C C D のピクセル分解能を考慮して、F E M の注目している節点の位置を、C C D 画像では X 軸方向に a ピクセル、Y 軸方向に b ピクセル移動した点と置換し、そのピクセルにおける振幅値をベクトルの値の一要素とする。

【0 0 4 1】

ステップ 1 0 6 では実験データ格納装置 1 2 に記憶されている固有周波数及びモードベクトルを読み出すと共に、ステップ 1 0 4 で並び替えたモードベクトルとのペアリング処理を行なう。モードのペアリング処理は、注目している実験のモードベクトルに対して相関度が高い、すなわち、最も似通った計算のモードベクトルを抽出する処理である。このモードのペアリング処理は、次のステップ 1

0.8で評価値を計算するために必要となる。

【0042】

モードのペアリング処理について、図4を参照して詳細に説明する。ステップ120において、候補となる計算結果のモードベクトル（計算モードベクトル）を選択する。候補となる計算結果のモードベクトルの数は、実際の構造物をモデル化したFEMのような大自由度系では数百個（例えば、200個）にもなり、モードベクトルのペアリング処理ではその中から最も似通ったモードベクトル（相関度が最も高いモードベクトル）を1つだけ抽出することになる。

【0043】

モードのペアリング処理を行う場合、フィルター処理を行なってモードベクトルを抽出すると効果的に演算できる場合がある。本実施の形態では、ステップ122において次数比フィルターで候補モードベクトルの数を絞り、ステップ124において部品間比較フィルターで更に候補モードベクトルの数を絞り、ステップ126において周波数フィルターを用いて候補モードベクトルの数を数個程度に絞っている。これによって、演算負荷を大幅に低減することができる。

【0044】

ステップ122の次数比フィルターは、空間上の直交座標系または円筒座標系等、適切な座標系の各軸方向に次数比分析を行い、各次数比の振幅・位相の構成が、基準とする実験の各次数比の振幅・位相の構成から指定した幅の範囲に含まれる計算モードベクトルのみモードのペアリングの対象とするものである。

【0045】

車両用ブレーキのロータを例にとって説明すると、ロータの中心部を中心として周方向に角度 θ 間隔で振幅データを抽出し、振幅が最大となる次数が実験と一致する計算モードベクトルのみを抽出する。

【0046】

ステップ124の部品間比較フィルターは、最も注目する部品の振幅に対して他の部品の振幅を許容範囲内に許容するためのフィルターであり、その許容範囲に含まれない計算のモードベクトルはモードのペアリングの対象外とするものである。部品が複数になると、部品Aが圧倒的に大きく動く、あるいは部品Bが圧

倒的に大きく動く等によって、複雑なモード形状を判別するまでもなく、部品間の振幅比を調査するだけでモードのペアリングから除外できることが分かる。このため、部品間の振幅比が許容値外のモードベクトルは、部品間比較フィルターによってモードのペアリングの候補から除外する。

【0047】

部品間の振幅比について、車両用ブレーキを例にとって説明すると、ロータの振幅を基準とした部品の振幅比を計算し（例えば、ロータの振幅比：1.0、パッドの振幅比：5.0、ピストンの振幅比：4.0等）、許容範囲外の振幅比をモードのペアリングの候補から除外する。

【0048】

この考え方は、部品間の振幅のみに限定するものではなく、部品間の位相や同一部品内での振幅・位相についても同様に適用することができる。

【0049】

ステップ126の周波数フィルターは、実験データの周波数から指定した幅の範囲（例えば、実験データの周波数±500Hz）に含まれる計算モードベクトルのみを抽出し、モードのペアリングの候補対象とするものである。

【0050】

なお、次数比フィルター、部品間比較フィルター、及び周波数フィルターは、いずれか1つを選択して使用しても良く、2つ組合せて使用してもよい。また、これらのフィルターを使用しないで後述するモードのペアリングを行なってもよい。

【0051】

モードのペアリングによって、実験モードと似通った計算モードベクトルを抽出するには、通常、モードの相関度を表す下記（1）式のMAC（Modal Assurance Criteria）が利用される。

【0052】

【数 1】

$$MAC = \frac{|A_m^T \cdot B_m|^2}{(A_m^T \cdot A_m)(B_m^T \cdot B_m)} \quad \dots (1)$$

【0053】

MACは、比較するモードが全く同じかあるいは殆ど同じ場合には有効であるが、比較するモードの相違度が広がりMACの値が0.9や0.8以下となる場合には、比較するモードベクトルが似通っている程度が、人間の感覚とずれる場合が少なくない。実験データに何らかの誤差が混入したり、実験計画法で境界条件の値を種々変えてモードベクトルを計算したりする場合には、比較する両者の相関度が低下するため、従来のMACのままでは不十分である。

【0054】

そこで本実施の形態では、SMAC (Super MAC) と呼ぶ手法を用いている。SMACは、下記(2)式に示すように1度にn(1、2、3、...)個の自由度を削除した場合の相関度MACの最大値(相関度の最大値)を表している。以下、ステップ128で演算される相関度の最大値、すなわちSMACの求め方について説明する。

【0055】

m自由度の計算モードベクトル A_m と、実験モードベクトル B_m との相関度MACは、上記の(1)式で与えられるが、本実施の形態では、この相関度MACに代えて下記(2)式で示される1回の演算でn個の自由度を削除した場合のMACの最大値を示すSMACを用いている。

【0056】

【数 2】

$$SMAC = \text{MAX} \left(\frac{|A_{m-nt}^T \cdot B_{m-nt}|^2}{(A_{m-nt}^T \cdot A_{m-nt})(B_{m-nt}^T \cdot B_{m-nt})} \right) \quad \dots (2)$$

【0057】

上記(2)式でMAX()は、()内の演算結果の最大値を表す関数であ

り、 t はSMACの演算回数を表し、 n は1回の演算で削除する自由度の個数を表す。

【0058】

SMACの演算について説明すると、まず、モードベクトル A_m 、 B_m の対応する自由度を、1個削除したときのモードベクトル A_{m-1} 、 B_{m-1} の相関度MACの値を計算し、さらに削除する1個の自由度を順に変えてこの計算を m 回繰り返し、各自由度を削除した場合の相関度MACの値を計算する。

【0059】

そして、得られた m 個の相関度MACを値が大きい順に並べ替え、1番から n 番目までの大きい相関度MACの値が得られた自由度を削除して、 $(m-n)$ 自由度のモードベクトル A_{m-n} 、 B_{m-n} の相関度MACを(1)式に従って演算し、ステップ130において、モードベクトル A_{m-n} 、 B_{m-n} の相関度MACが閾値（例えば、0.8）を越えているか否かを判断する。

【0060】

ステップ130で閾値を越えていないと判断されたときは、更に n 個の自由度を削除して $(t+1)$ 回目の演算を行なうために、ステップ132からステップ128に戻って、上記で説明したのと同様に、残存自由度のモードベクトル A_{m-n} 、 B_{m-n} の対応する自由度を順に1個削除したときのベクトル A_{m-n-1} 、 B_{m-n-1} の相関度MACの値の計算を繰り返す。

【0061】

そして、上記で説明したように相関度MACの値を大きい順に並べ替え、最大値から n 番目までの大きい相関度MACの値が得られた自由度を削除し、モードベクトル A_{m-2n} 、 B_{m-2n} の相関度MACを(1)式に従って演算し、ステップ130において、モードベクトル A_{m-2n} 、 B_{m-2n} の相関度MACが閾値を越えているか否かを判断する。

【0062】

一方、相関度MACが閾値を越えている場合には、ステップ136において候補としている全ての計算モードベクトルについて、実験モードベクトルとの相関度を演算したか否かを判断し、全ての計算モードベクトルについて演算が終了し

ていない場合には、ステップ134において計算モードベクトルを次の計算モードベクトルに変更して上記ステップ128～ステップ130の演算を繰り返す。

【0063】

t回目の演算のSMACは上記(2)式のように表され、そのときに相関度MACが閾値を越えていれば、削除した自由度はnt自由度ということになる。

【0064】

SMACを用いた場合の相関度の大小は、この削除したnt自由度で表現する。指標としては、式(3)に示すように、全体のm自由度に対する残存している自由度(m-nt)の比で表される自由度残存率を用いる。

【0065】

ステップ138では、自由度残存率を演算し、その値が最大の計算モードベクトル、すなわち最小のtを与える計算モードベクトルを実験モードベクトルと相関度が高いとみなし、自由度残存率が最大の計算モードベクトルと実験モードベクトルとをペアとする。

【0066】

【数3】

$$SMAC\text{自由度残存率} = 1 - \frac{nt}{m} \quad \dots (3)$$

【0067】

図5に、削除自由度の個数と相関度の最大値との関係を示す。計算モードベクトルAは、計算モードベクトルBより少ない削除自由度数で相関度の最大値が閾値を越えているので、この計算モードベクトルAが、実験モードベクトルに対するペアとして選択される。

【0068】

部品が複数になると、部品によっては節点数が多い場合、あるいは少ない場合が発生する。そのような場合は、単純に全節点を対象にSMACを計算すると、節数の多い部品の影響が大きく現れる傾向がある。この傾向を回避するためには、SMACを計算する領域を部品毎に分割し、各領域のSMACの自由度残存率に適切な重み付けを行なって重み付き平均値を演算し、演算した重み付き平均値

を全体のSMACとして評価すればよい。

【0069】

また、SMACを演算する際に削除する自由度を任意にすると、重要な節点が削除されてしまう場合があるので、このような場合には、削除してはいけない節点のリストを作成し、このリストを参照してSMACの自由度削除プロセスを実行すればよい。ここで、削除しても良い点というのは、実験データに誤差が混入している可能性が高い部位、またはモードベクトルの腹と節との中間的な領域である。逆に、削除してはいけない点というのは、明らかに実験データが正確と判断できる領域やモードベクトルの腹と節の部分である。

【0070】

上記のようにしてモードのペアリングを行なった後、ステップ108において評価値の計算を行なう。評価値としては、下記の(4)式及び(5)式に示すように、スカラー量(固有周波数)とベクトル量(モードベクトル)との各々について、実験モードベクトルと、ペアリングによって対応付けられた計算モードベクトルとの残差二乗和を求め、これらの残差二乗和を正規化したものに適切な重みを掛けて加算した(6)式に示す値を用いることができる。

【0071】

【数4】

・モードベクトルについて

$$f(x) = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \beta_{ri} (\Phi_{ri} - \Phi_{ri}^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots (4)$$

・周波数について

$$g(x) = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m \alpha_r (\lambda_r - \lambda_r^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots (5)$$

【0072】

上記の残差二乗和を指定した直交表の条件について算出し、全条件の平均値で下記のように正規化して、(6)式に示すように加算した値を評価値とする。

【0073】

【数5】

正規化： $f(x) \rightarrow \overline{f(x)}$, $g(x) \rightarrow \overline{g(x)}$

評価関数 = $w_m \overline{f(x)} + w_f \overline{g(x)}$. . . (6)

【0074】

ここで、

x ：設計変数のベクトル（例えば、同定対象定数 n 個）、

λ_r ： r 次の固有周波数、

Φ_{ri} ： r 次のモードベクトル（ i 番目の成分）、

λ_r^* ： r 次の固有周波数の目標値、

Φ_{ri}^* ： r 次のモードベクトル（ i 番目の成分）の目標値、

m ：対象とするモード数、

D ：対象とする自由度数、

α_r ： r 次の固有周波数の重み、

w_m, w_f ：ベクトルと周波数の重み係数、

β_{ri} ： r 次のモードベクトルの重み（ i 番目の成分の係数）、

である。

【0075】

なお、(6) 式の重みを零にして、スカラー量のみを使用した値やベクトル量のみを使用した値も評価値として使用することが可能である。また、固有周波数やモードベクトルの総数は、解析者が自由に選択できる。

【0076】

上記ステップ108で、実験計画法の直交表の条件毎に評価値（特性値）が得られたので、ステップ110では、応答曲面法によって、これら特性値を直交表の全条件に対して入力して分散分析を行い、影響度の大小を評価して適切な推定式を作成する。推定式を多項式で作成する際、その現象を表現できる次数の多項式にする。2次多項式であれば、上記ステップ102の水準を3に、4次多項式であれば、上記ステップ102の水準を5に、というように N 次多項式が必要で

あれば、上記ステップ102で $N+1$ 水準の設定をしておく。推定式が特性値をよく再現できることを確認した後、初期値と設計変数の範囲を定め、コンプレックス法を用いて特性値（実験の計算との誤差）が最小となる同定値を求める。

【0077】

以上説明したように、本実施の形態によれば、解析者が構造物を眺めて、同定対象の境界条件を選択し、範囲を設定するだけで、解が発散することもなく、容易に同定値を得ることができる。

【0078】

なお、上記では、同定の際に用いる評価指標として、構造物の固有周波数とモードベクトルを用いたが、実験の物理量と対応していれば、強制応答時の共振周波数とその周波数におけるモードベクトルを用いても良いし、機構物のある時刻の運動形態（モードベクトル）であっても良い。そのような場合には、上記ステップ102の固有値解析の代わりに、強制加振応答計算や適切な外力を入力した応答計算を行ない、その結果を利用することになる。

【0079】

ブレーキ鳴き現象をシミュレートする加振実験データを参照データとして、部品間接触部の局部剛性を表現した18個の部品間同定対象を設け、ブレーキアセンブリー状態で存在する部品間接合同定対象を同定した結果を図6に示す。図6に示すように、本実施の形態を適用した同定値は、実績値に対して良好な結果が得られている。

【0080】

また、有限要素モデルが大規模になる場合には、図7に示すように、有限要素モデルとして、部品単体各々に対して、必要な周波数帯域までのモードベクトルを採用したモード縮退モデルを用いることにより、効率よく解析対象物の部品間境界条件を同定することができる。

【0081】

本実施の形態において、求めた同定値をデータベース化すれば、部品境界部の設計指針の提示に寄与できる。

【0082】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、振動や運動を精度良く定量的に扱うことができ、高周波数帯域まで精度の良い解析ができる解析対象物の部品間境界条件の同定方法を提供することができる、という効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の実施の形態の部品間境界条件の同定方法を実施するための同定装置のブロック図である。

【図 2】 本発明の実施の形態の同定ルーチンを示す流れ図である。

【図 3】 (A) は車両用ブレーキの F E M モデルを示す概略斜視図、(B) 部品間ばねの例を示す断面図である。

【図 4】 図 2 におけるモードのペアリング処理の詳細を示す流れ図である。

【図 5】 削除自由度に対する S M A C の変化を示す線図である。

【図 6】 F E M モデルを縮退させた縮退モデルの例を示す概略図である。

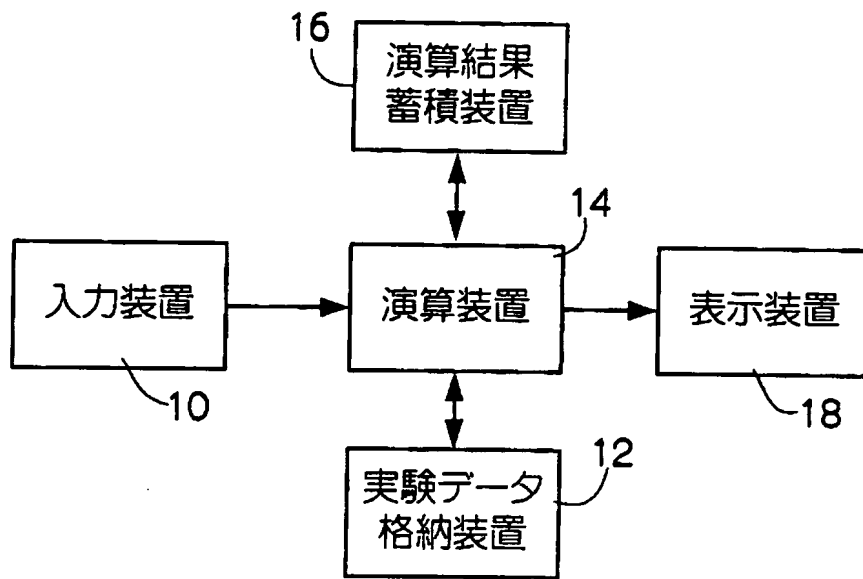
【図 7】 本実施の形態における同定結果を実績値と比較して示すグラフである。

【符号の説明】

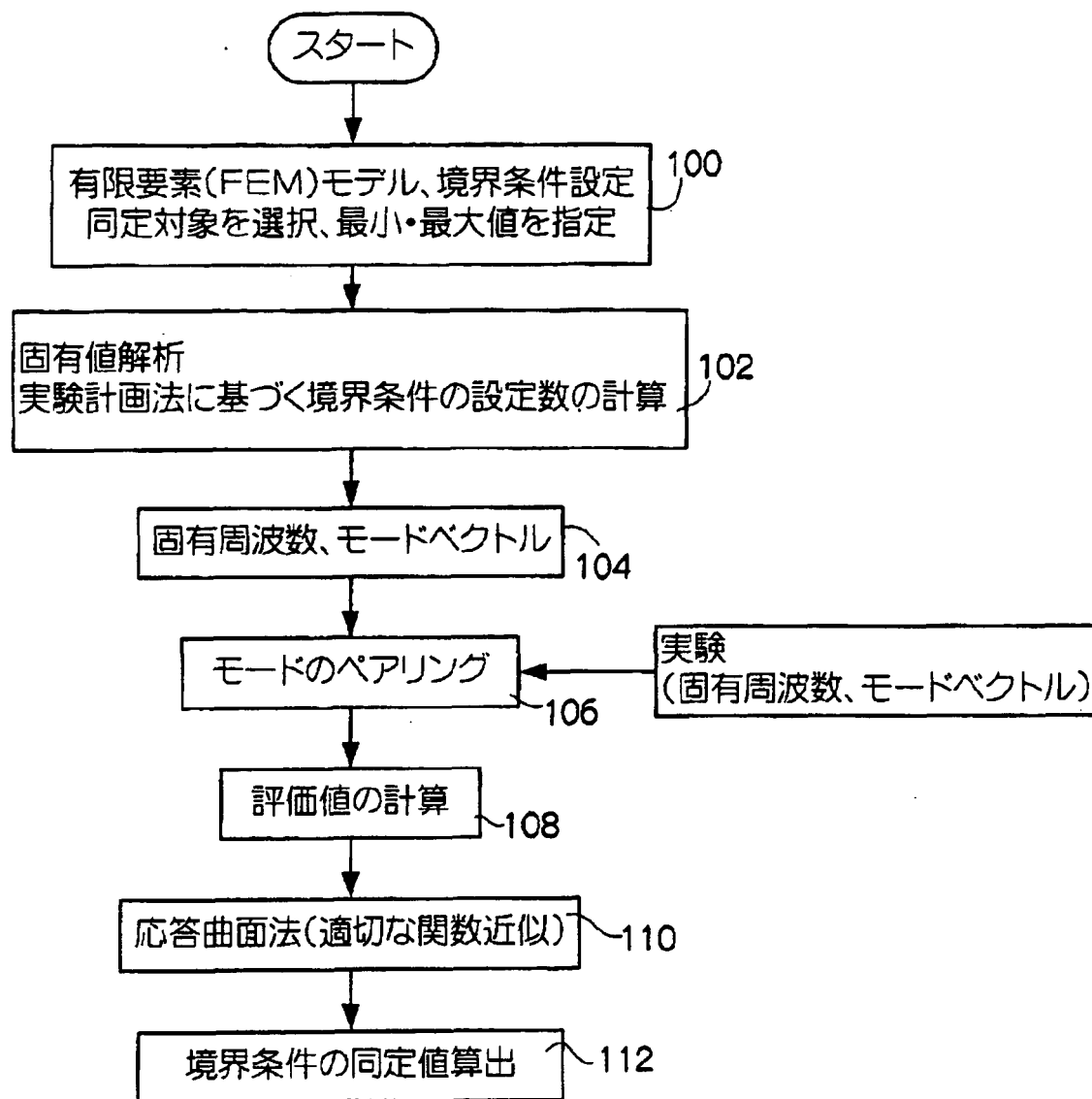
- 2 2 ピストン
- 2 4 パッド
- 2 8 部品間ばね

【書類名】 図面

【図 1】

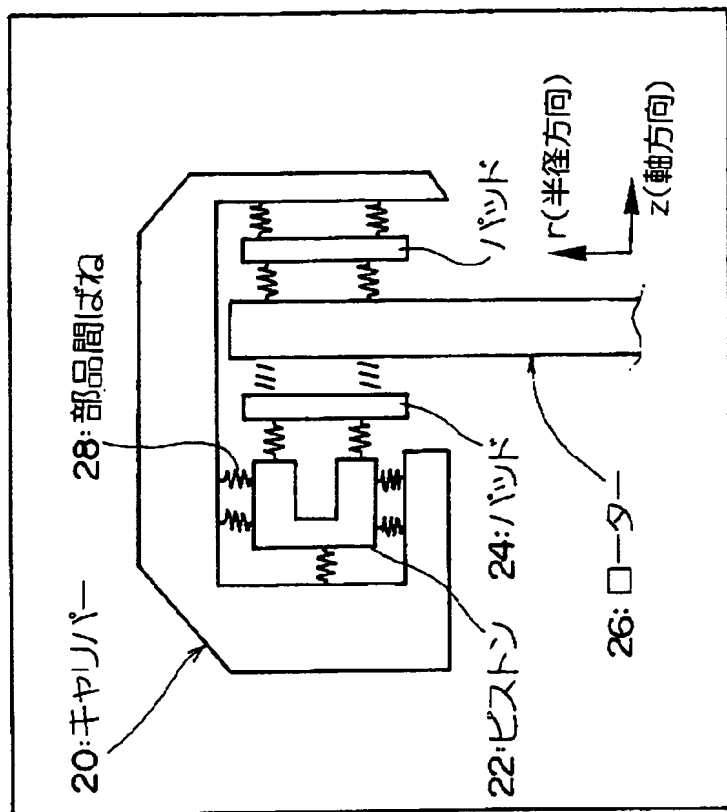


【図 2】



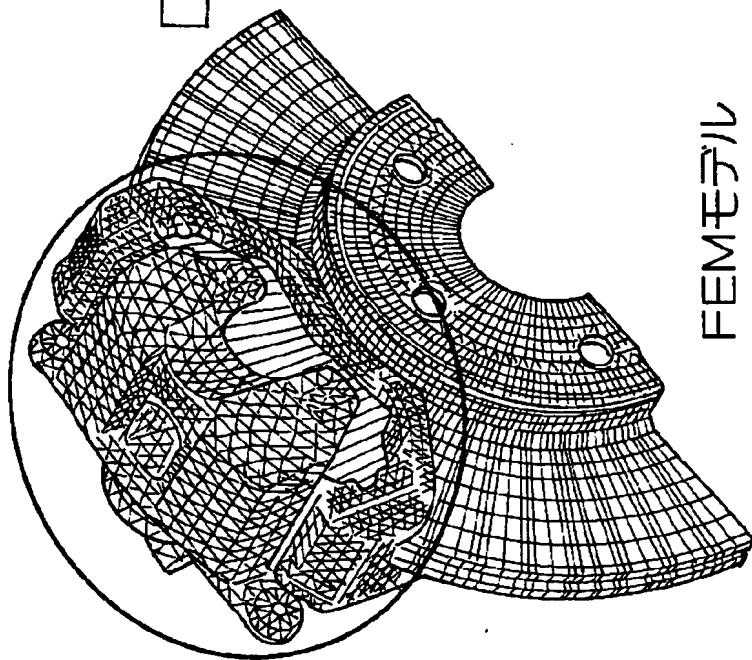
【図 3】

(B)

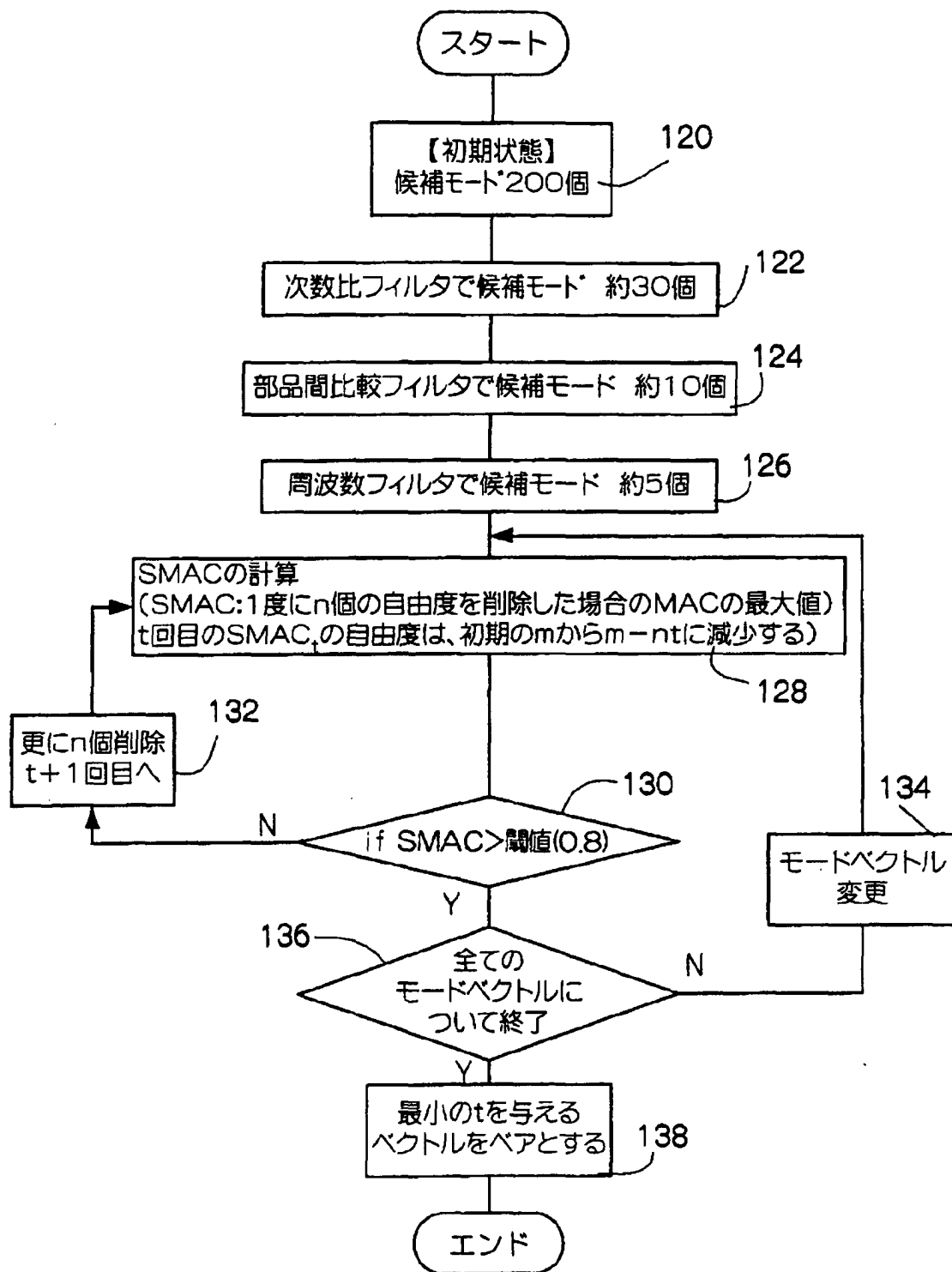


部品間ばね例

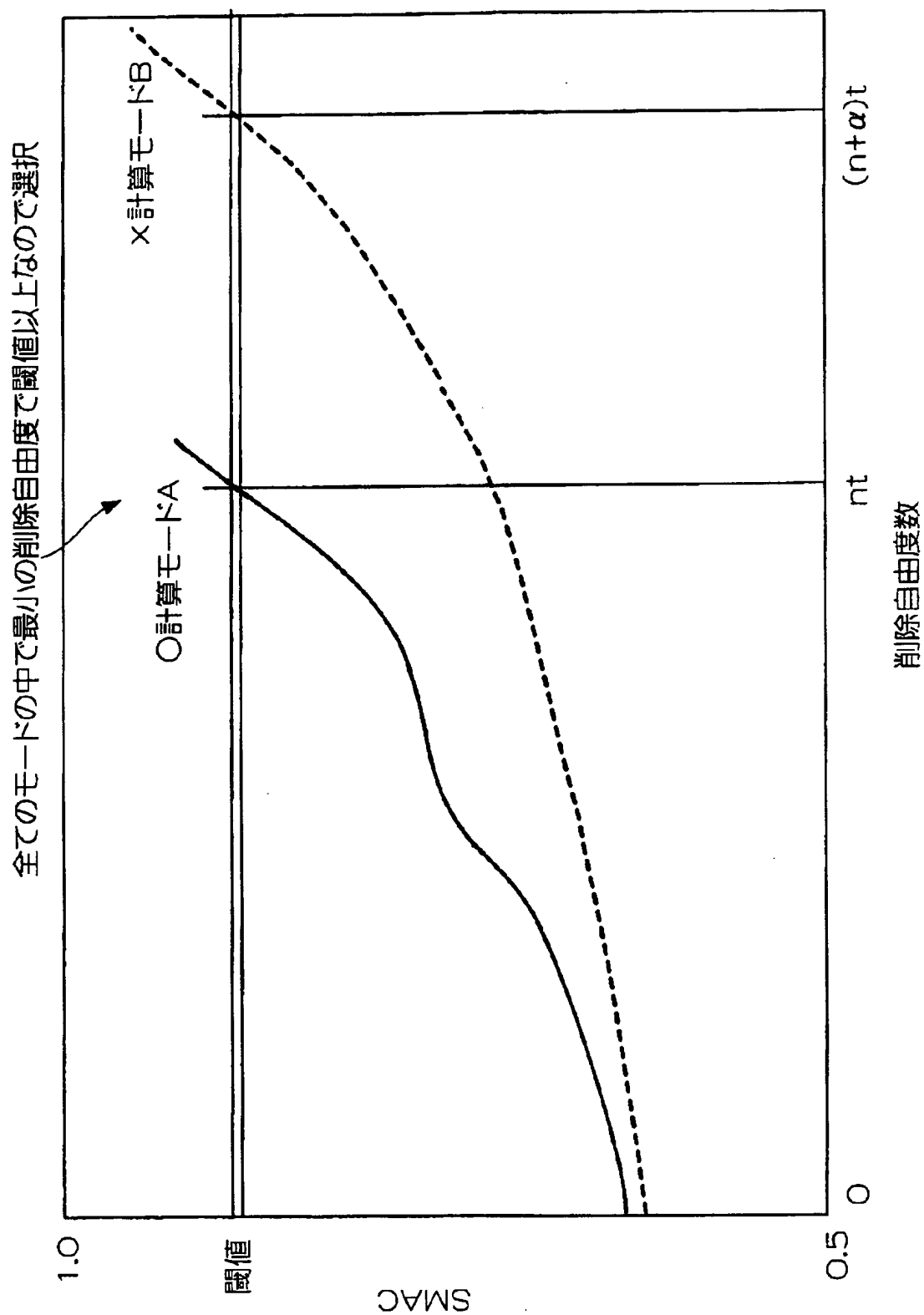
(A)



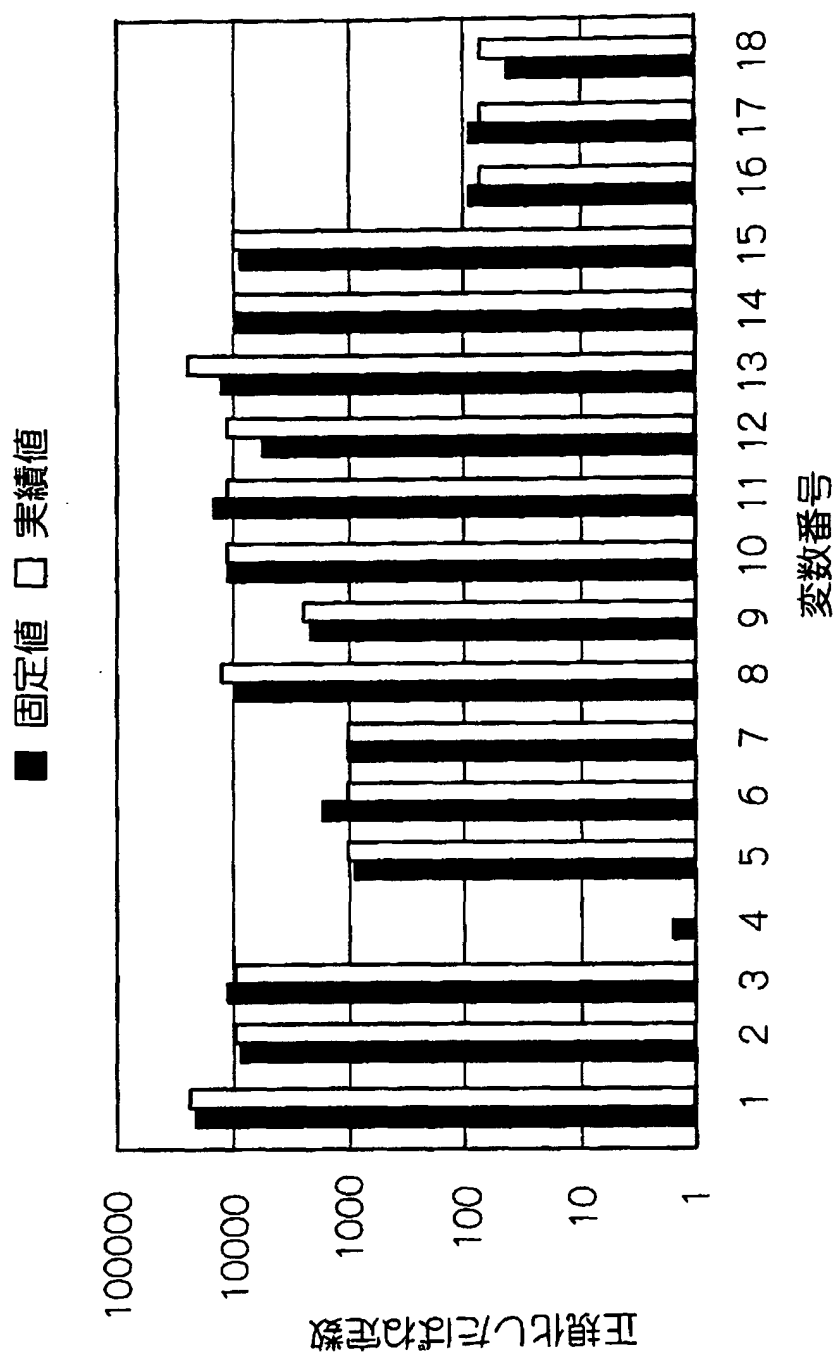
【図4】



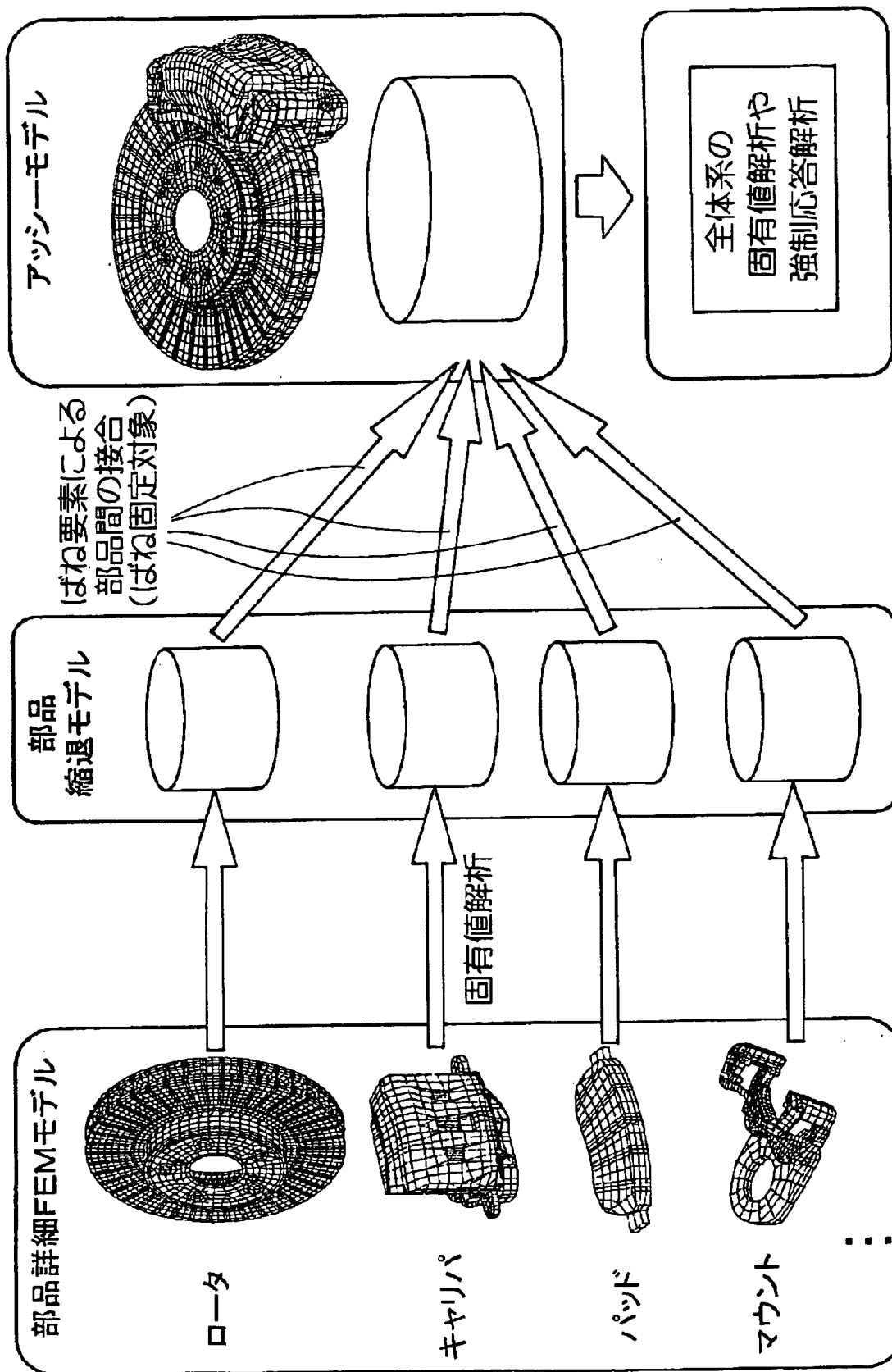
【図 5】



【図 6】



【図 7】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 振動や運動を精度良く定量的に扱うことができ、高周波数帯域まで精度の良い解析ができる部品間境界条件の同定方法を提供する。

【解決手段】 複数部品で構成された解析対象物と、解析対象物の各部品間に位置しかつ各部品間の境界条件を表す複数の要素とを含んだ解析用の有限要素モデルを作成し（１００）、固有周波数とモードベクトルとを計算し（１０４）、実験モードベクトルに対して相関度が高い計算モードベクトルを抽出してペアとし（１０６）、抽出した計算モードベクトル及び計算モードベクトルに対応する固有周波数に基づいて、各要素の境界条件を同定する。

【選択図】 図２

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000003609]

1. 変更年月日 1990年 9月 6日

[変更理由] 新規登録

住 所 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1

氏 名 株式会社豊田中央研究所

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000003207]

1. 変更年月日 1990年 8月27日
[変更理由] 新規登録
住 所 愛知県豊田市トヨタ町1番地
氏 名 トヨタ自動車株式会社